

[电缆接头]

10 kV T型电缆接头半导体尖端缺陷的电场分布仿真研究

文/李永旭 白玉庆 宋纯伟 修俊瑞
国网山东省电力公司聊城供电公司

建立环网柜中常用的JB-10/630型10 kV T型电缆接头电场模型，研究硅橡胶绝缘层与交联聚乙烯绝缘层交界面处存在金属和半导体尖端缺陷时的电场分布特性。通过分析不同缺陷程度和不同电压等级下的电场分布规律，研究发现：当接头存在半导体尖端缺陷时，缺陷周围绝缘材料会出现显著电场畸变现象，其中缺陷尖端处的场强畸变最为严重；随着缺陷尺寸的增大或施加电压的升高，缺陷区域的电场强度呈现明显递增趋势。

随着现代电力系统的快速发展和智能化转型，电缆接头作为电力传输网络中的关键连接部件，其运行安全性和长期可靠性对整个配电系统的稳定运行至关重要。10 kV T型电缆接头因其绝缘性能好、安装便捷等特点，在配电网环网柜中得到广泛应用，承担着电能连接和分配的重要功能。

在实际工程应用中，T型电缆接头的安装质量往往受到多方面因素的影响：现场安装环境复杂多变，施工空间受限，给规范操作带来挑战；安装人员的专业技能水平参差不齐，部分施工人员对T型接头的结构特点和安装工艺要求理解不够深入；在电缆剥切、半导体层处理等关键工序中，操作不当或工具使用不规范，极易在硅橡胶绝缘层与交联聚乙烯绝缘层交界面处产生半导体尖端等缺陷。缺陷的产生会破坏绝缘结构的完整性，导致局部电场严重畸变，成为电缆接头早期失效的重要诱因。因此，深入研究T型电缆接头在金属和半导体尖端缺陷条件下的电场分布特性，对提升接头安装质量、预防绝缘故障具有重要的工程实践价值^[1-3]。

半导体尖端缺陷会导致电场分布不均匀，引发电场畸变，进而可能引发绝缘材料的老化和击穿，

严重影响电缆接头的绝缘性能和使用寿命^[4-6]。同时，缺陷处的电场集中可能会导致局部放电，产生热量，影响电缆接头的温度场分布，进一步威胁其安全运行^[7-8]。

针对电缆半导体尖端缺陷问题，引起学者关注。文献[9]研究10 kV交联聚乙烯电缆接头包括半导体尖端缺陷等5种缺陷的局部放电特性，采用高频电流法获取不同缺陷模型下的局部放电数据并形成典型图谱。试验表明，高频电流法对检测10 kV XLPE电缆局部放电是可行且有效的。文献[10]通过在电缆接头中设置半导体尖端，利用有限元仿真软件进行电场分布的研究，主绝缘上残留的半导体尖端导致较大的场强畸变，周围电场分布由原来的375 V/mm增加到590 V/mm。文献[11]通过实验的方法制作电缆接头半导体尖端缺陷，构建电容耦合传感器，进行局部放电试验。结果表明：半导体尖端缺陷使电场发生畸变，各电压等级下放电特性谱图有明显特征。通过二维小波变换提取这些特征，可为高压电缆线路局部放电诊断提供数据样本。文献[12]利用有限元仿真平台构建了接头的三维模型，针对半导体尖端等缺陷进行了仿真分析。结果

基金项目：国网山东省电力有限公司科技项目（520611230003）。

表明，缺陷部位会出现电场分布异常，且随着运行时间的增加，电缆绝缘的损伤程度会逐渐加重，最终可能引发绝缘击穿，造成电缆故障。

为深入研究这些缺陷对电缆接头性能的影响，本文采用有限元仿真方法，对10 kV T型电缆接头在存在半导体尖端缺陷时的电场分布特性进行仿真分析。揭示缺陷对电缆接头性能的影响规律，为电缆接头的设计、制造和运行维护提供理论依据和技术支持，有助于提高电缆接头的可靠性和电力系统的稳定性。

模型建立

1. T型电缆接头结构及参数

本文以10 kV环网柜系统采用的JB-10/630型T型电缆接头作为研究对象，构建T型电缆接头的三维仿真模型。图1展示该模型的关键截面示意图，主要材料及其关键仿真参数见表1。

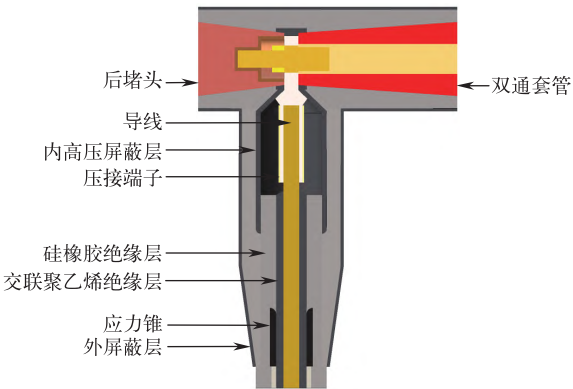


图1 T型电缆接头 (JB-10/630) 剖视图

表1 主要材料仿真参数

结构部位	介质材料	导热系数 /[W/(m·K)]	电导率 /(S/m)	相对介电常数
导体	铜	400	5.8×10^7	1×10^4
绝缘层	XLPE	0.33	3.92×10^{-15}	2.09
应力锥	半导体	0.35	2	30
双通套管	硅树脂	0.8	3.92×10^{-15}	3.5

2. 各物理场控制方程

本研究针对10 kV环网柜T型电缆接头在工频交流运行条件下的电场特性进行分析。在实际工况下，由于电流密度为位移电流密度的 10^7 倍，故在建模时可忽略位移电流的影响，本文采用准静电场模型进行仿真计算。

电磁场的控制方程为

$$\begin{cases} \nabla H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla B = 0 \\ \nabla E = J + \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla D = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中， ∇ 为矢量微分算子； H 为磁场强度； ρ 为电荷密度； B 为磁感应强度； E 为电场强度； J 为电流密度； D 为电位移矢量。

当介电质为各向同性时，其电磁场控制方程为

$$\begin{cases} J = \gamma E \\ D = \varepsilon E \end{cases} \quad (2)$$

式中， γ 为电导率； E 为电场强度； ε 为相对介电常数。

3. 网格划分

研究采用自由四面体单元对T型电缆接头三维模型进行网格划分处理。基于环网柜实际运行参数，设置如下边界条件：导体端施加8.7 kV工作电压，电流设定为630 A；设备外壳采用接地处理；环境温度基准值设为20 ℃；模型外围空气域采用自然对流换热边界条件，其表面传热系数取5 W/(m²·K)。

4. 半导体尖端缺陷设置方法

本模型通过设置半径分别为半导体尖端为底半径0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm和3 mm，高度1 mm的椎体状缺陷；端底半径为1 mm，高度分别为1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm和3.5 mm的椎体状缺陷模型来模拟不同程度的半导体尖端缺陷，将缺陷设置硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面，研究发生半导体尖端缺陷对电场分布影响如图2所示。

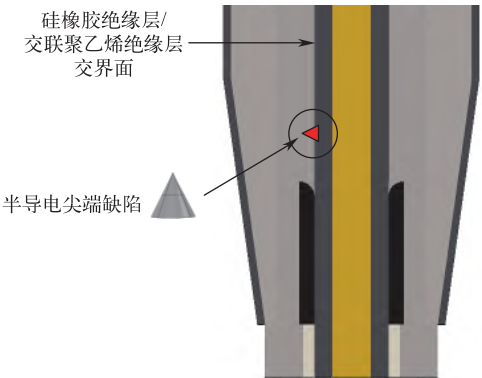


图2 半导体尖端缺陷模型示意图

仿真结果与分析

1. 电场分布特性仿真与分析

1.1 半导体尖端缺陷电场分布特性

设置半径为0.5 mm高度为1 mm的椎体状半导体尖端放置于T型电缆接头硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层界面，其半导体尖端缺陷的轴向和径向电场分布如图3和图4所示。

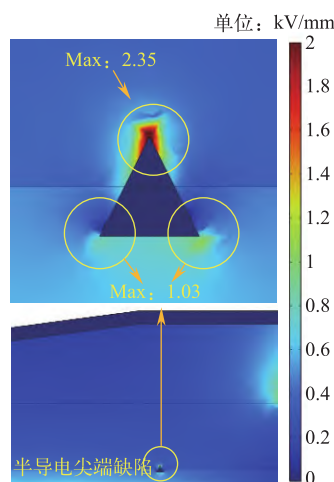


图3 半导体尖端缺陷径向电场分布图

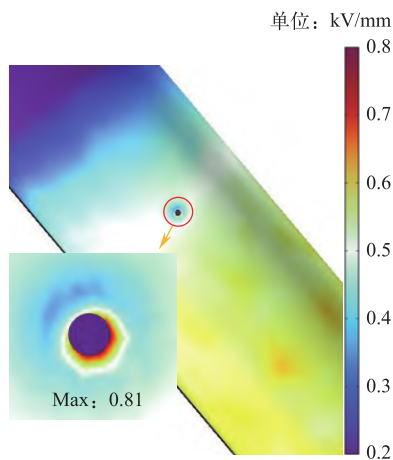


图4 半导体尖端缺陷轴向电场分布图

图3展示了当硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯的界面出现半导体尖端缺陷时的径向电场分布图情况。在电缆接头复合界面缺陷周围，电场出现了显著畸变，其中，硅橡胶绝缘层界面的最大缺陷畸变电场强度达到2.35 kV/mm，而交联聚乙烯绝缘层界面缺陷的最大畸变电场强度约为1.03 kV/mm。界面上缺陷处电场集中分布区域集中在缺陷与周围介质的交界边界和端点上。若缺陷处发生局部放电，会从与

周围介质的交界面和顶点处开始。

图4展示了当硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯的界面出现半导体尖端缺陷时的轴向电场分布图情况。硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层界面的半导体尖端缺陷引发的电场畸变程度非常严重，其轴向变化规律为越靠近缺陷处电场强度不断上升，在缺陷的边沿处产生最大场强值，图4中半导体缺陷引发的最大畸变电场强度仍位于缺陷的顶点处，由无损模型时的0.5 kV/mm增加到0.81 kV/mm，畸变率高达62%。

1.2 不同尺寸的半导体尖端缺陷电场分布特性

设置半径为半导体尖端缺陷为底半径0.5 mm、1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm，高度1 mm的椎体状半导体尖端放置于T型电缆接头硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层界面，研究不同底半径对半导体尖端缺陷电场分布的影响，其电场分布如图5所示。

由图5可知，电缆接头绝缘界面存在不同底半径的半导体尖端时，电场强度峰值都在尖端处产生，表明尖端的存在会导致电场的突变。

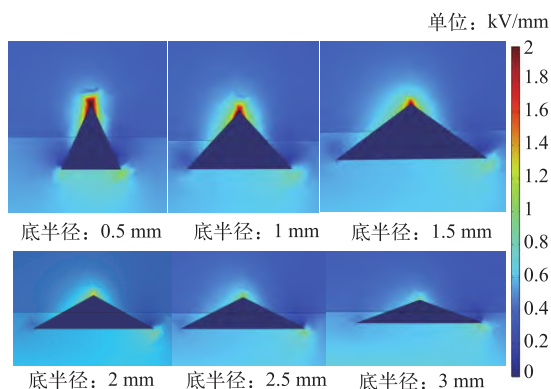


图5 不同底半径的半导体尖端缺陷电场分布

由图6可知，当底半径从0.5 mm增加到3 mm时，硅橡胶绝缘层电场强度峰值由2.35 kV/mm下降至0.87 kV/mm，下降了63.0%；交联聚乙烯绝缘层电场强度峰值由1.03 kV/mm下降至0.8 kV/mm，下降了22.3%。这表明，随着半导体尖端底半径的增大，电场畸变程度显著降低，且两种绝缘材料的电场强度峰值均呈现明显下降趋势，底半径与电场畸变程度成反比关系。

端底半径为1 mm，高度分别为1 mm、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm和3.5 mm的椎体状

半导体尖端缺陷放置于T型电缆接头硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面，其缺陷的电场分布如图6所示。

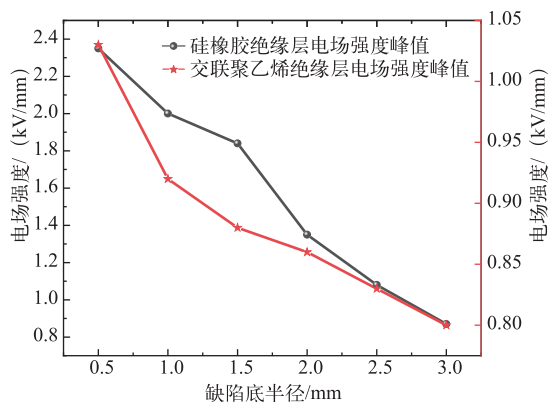


图6 不同底半径的半导体尖端缺陷两绝缘层电场畸变峰值曲线

由图6可知，展示了不同高度的半导体尖端缺陷在电缆接头绝缘界面的电场分布情况。从图6中可以看出，随着尖端高度的增加，电场强度峰值在尖端处逐渐变大。

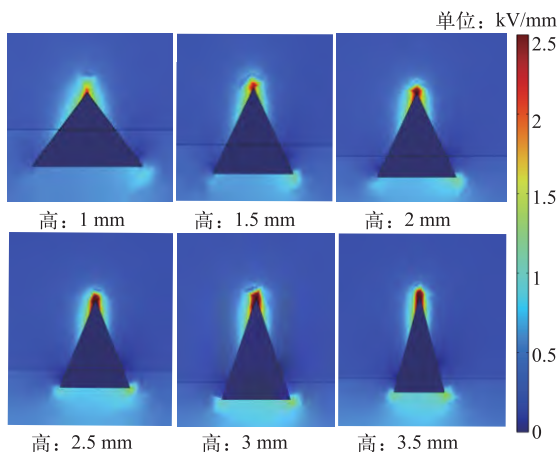


图7 不同高度的半导体尖端缺陷电场分布

从图7的曲线分析，硅橡胶绝缘层的电场强度峰值随着尖端高度的增加而逐渐上升，从1 mm时的约2.0 kV/mm增加到3.5 mm时的约3.6 kV/mm。而交联聚乙烯绝缘层的电场强度峰值也随尖端高度的增加而上升，从1 mm时约0.9 kV/mm增加到3.5 mm时的约1.3 kV/mm。表明尖端高度的增加会导致电场畸变程度加剧，进而可能增加绝缘击穿的风险。因此，在电缆接头的设计和制造过程中，需要严格控制尖端缺陷的高度，以降低电场畸变，提高绝缘性能和运行可靠性。

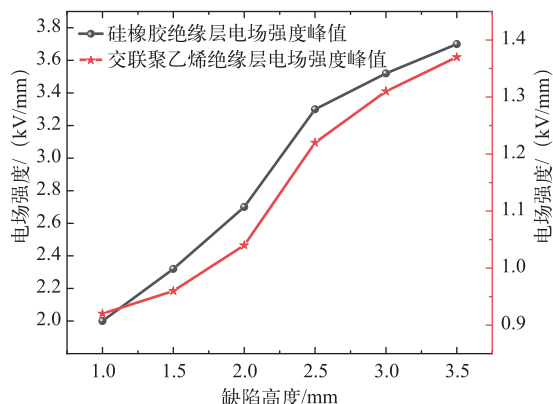


图8 不同高度的半导体尖端缺陷两绝缘层电场畸变峰值曲线

1.3 不同电压的半导体尖端缺陷电场分布特性

设置底面半径0.5 mm、高度1 mm的椎体状半导体尖端，置于T型电缆接头硅橡胶绝缘层与交联聚乙烯绝缘层的交界面。通过在T型电缆接头线芯处分别施加10 kV、12 kV和15 kV的电压，研究不同电压下半导体尖端缺陷电缆接头的电场特性。在交界面电场峰值见表2。

表2的数据显示，随着施加电压的提升，不同交界面半导体尖端缺陷周围的电场畸变逐渐加剧。特别是在硅橡胶/交联聚乙烯绝缘层交界面，电场畸变达到了1.85 kV/mm。表明在高电压下，T型电缆接头面临绝缘击穿的潜在风险，因此需要采取相应措施来确保设备的安全运行。

表2 不同电压下半导体尖端缺陷电场强度峰值

施加电压/kV	硅橡胶绝缘层/交联聚乙烯绝缘层交界面/(kV/mm)
10	0.93
12	1.43
15	1.85

结束语

本研究设置了底半径0.5~3 mm、高度1~3.5 mm的椎体状半导体尖端缺陷模型，将其置于T型电缆接头硅橡胶绝缘层与交联聚乙烯绝缘层的交界面，以探究半导体尖端缺陷对电场分布的影响。

1) 研究发现，随着底半径的增大，电场强度峰值逐渐降低，硅橡胶绝缘层的电场强度峰值从2.35 kV/mm下降至0.87 kV/mm，交联聚乙烯绝缘层从1.03 kV/mm下降至0.8 kV/mm，表明底半径与电场畸变程度呈反比关系。而随着尖端高度的增

加, 电场强度峰值在尖端处逐渐变大, 硅橡胶绝缘层的电场强度峰值从1 mm时的约2.0 kV/mm增加到3.5 mm时的约3.6 kV/mm, 交联聚乙烯绝缘层从1 mm时的约0.9 kV/mm增加到3.5 mm时的约1.3 kV/mm, 表明尖端高度的增加会导致电场畸变程度加剧。

2) 在不同电压下, 电场畸变程度也随之变化。当施加电压从10 kV增加到15 kV时, 硅橡胶/交联聚乙烯绝缘层交界面的电场畸变逐渐加剧, 15 kV时达到1.85 kV/mm, 接近空气击穿场强, 表明高压下电缆接头存在击穿风险。EA

(收稿日期: 2025-01-21)

参考文献

- [1] 黄博, 杨铭远, 聂永杰, 等. 绝缘材料热老化对电缆终端接头典型缺陷处电场畸变的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 124-132.
- [2] 赵筱赫, 杨捷, 李士强, 等. 电缆中间接头缺陷仿真与局部放电实验研究[J]. 河南工学院学报, 2024, 32(2): 1-7.
- [3] 邱冬, 刘刚, 李旭, 等. 10 kV T型电缆接头在界面爬电下的多物理场特性研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(11): 179-183.
- [4] 邓繁盛, 高媛, 李秀峰, 等. 基于电-热-力场的10 kV电缆终端典型缺陷仿真研究[J]. 绝缘材

料, 2023, 56(3): 100-106.

- [5] 赵腾飞, 聂永杰, 孙成. 10kV环网柜电缆肘型头故障分析[J]. 山西电力, 2022, (3): 26-29.
- [6] 杜伟, 汪超, 张帆, 等. 电缆中间接头受潮时界面放电试验研究[J]. 电工材料, 2022, (1): 63-68.
- [7] 刘浩然. 基于电磁—热—力特征的电缆接头缺陷识别研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- [8] 刘英, 苏宇, 李文沛. 10 kV XLPE电缆接头的电场模拟方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 30-35.
- [9] 应高亮, 张波, 卢晓峰, 等. 10kV交联聚乙烯电缆接头缺陷局部放电特性的研究[J]. 浙江电力, 2014, 33(3): 5-9.
- [10] 江天炎, 成守花, 毕茂强, 等. 基于ANSYS的电缆接头典型绝缘缺陷电-热场仿真研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(9): 151-158.
- [11] 姜芸, 闵红, 罗俊华, 等. 220kV电缆接头半导电尖端缺陷的局部放电试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2657-2661.
- [12] 郝云倩. 含缺陷的XLPE电缆接头电磁—热特性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.

(上接第134页)

自锁, KM2、KA2线圈长期得电, 电动机工频连续运转。KT2断电延时断开常开触点经延时数秒后断开, KT1线圈失电, 则KT1得电延时闭合常开触点瞬时断开。电动机依靠KM2自锁触点连续工频运转。

3) 现场操作柱手动停机。按停止按钮2SBC, KM2线圈失电, KM2主触头断开, KM2常开自锁触点断开, 电动机停止运转。DCS停机: 给DCS停机指令, KM2线圈失电, KM2主触头断开, KM2常开自锁触点断开, 电动机停止运转。

4) 负载过电流闭锁及负载接地闭锁。当发生外部短路故障时R2闭合, 则KA6得电, KA6常开

触点闭合(负载接地故障时漏电保护器常开触点闭合), KA6线圈长期得电, KA6常闭触点断开, KM2线圈不能得电, 闭锁了变频自动切换工频的功能。

结束语

“低压变频器变频故障自动切换工频”项目, 是仪电两个专业首次深入合作进行的攻关项目, 并且过程中与生产单位密切沟通, 根据生产工艺调整设计方案, 多专业联动, 规避风险。目前, 试验时平台已经模拟试验成功, 具备应用条件。EA

(收稿日期: 2024-04-29)